



DOI: 10.17512/bozpe.2019.1.11

Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym
Construction of optimized energy potential

ISSN 2299-8535 e-ISSN 2544-963X



Modelowanie dynamiczne instalacji termofotowoltaicznych

Karolina Papis¹ (*student*)

Michał Frączek² (*student*)

Mariusz Filipowicz³ (*orcid id: 0000-0002-1931-9383*)

^{1,2,3} AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw

Streszczenie: Ze względu na rosnące zapotrzebowanie na energię z odnawialnych źródeł konieczne jest poszukiwanie nowych sposobów jej pozyskania. Jednym ze sposobów na maksymalizację wykorzystania promieniowania słonecznego jest konstrukcja hybrydowych kolektorów słonecznych. Są one w stanie generować energię elektryczną z wyższą sprawnością niż standardowe instalacje ze względu na układ chłodzenia cieczonego, dodatkowym zyskiem jest podgrzewanie wody do późniejszego wykorzystania do celów grzewczych. W pracy przedstawiono model dynamiczny oraz analizę parametrów pracy monokrystalicznego panelu fotowoltaicznego połączonego z kolektorem, tworzących prototypowy układ PVT. Na podstawie badań eksperymentalnych wyznaczono charakterystyki prądowo-napięciowe i prądowo-mocowe części fotowoltaicznej oraz parametry cieplne pracy układu, które posłużyły do walidacji stworzonego modelu dynamicznego instalacji. Symulacje przeprowadzone w programie TRNSYS pozwoliły na analizie pracy różnych układów w trakcie roku.

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, fotowoltaika, fototermika

Użytkowanie treści artykułu tylko w oparciu o licencję Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0

Proszę cytować ten artykuł w następujący sposób:

K. Papis, M. Frączek, M. Filipowicz, Modelowanie dynamiczne instalacji termofotowoltaicznych, Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, vol. 8, 1, 2019, 103-113, DOI: 10.17512/bozpe.2019.1.11

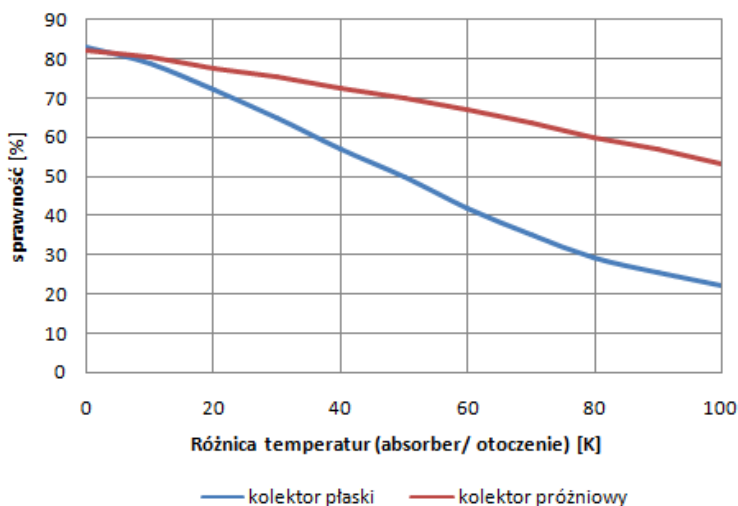
Wstęp

Ze względu na niskie sprawności i brak stabilnej pracy systemów wykorzystujących odnawialne źródła energii dobrym rozwiązaniem jest stosowanie układów hybrydowych, które wykorzystują przynajmniej dwa źródła energii w celu zwiększenia całkowitej wydajności systemu (Khelifa i in., 2015). Jednym z takich

urządzeń jest hybrydowy kolektor słoneczny PVT (ang. *PVT - photovoltaic thermal*, fotowoltaiczno-termiczny). Łączy on w jedno panel fotowoltaiczny (PV) oraz płaski kolektor słoneczny (T) i wykorzystuje promieniowanie słoneczne o różnym zakresie długości fal.

Obecnie najpopularniejszym sposobem wykorzystania promieniowania słonecznego są instalacje kolektorów służące do przygotowania ciepłej wody użytkowej CWU. Fotowoltaika jest mniej rozpowszechniona, głównie ze względu na stosunkowo niskie sprawności, jakie osiągają dostępne panele komercyjne: krzemowe monokrystaliczne 15-19%, krzemowe polikrystaliczne 13-15% (Lewandowski i Klugmann-Radziemska, 2017) oraz jeszcze ciągle wysokie koszty instalacji i związane z tym odpowiednio długi czas zwrotu inwestycji.

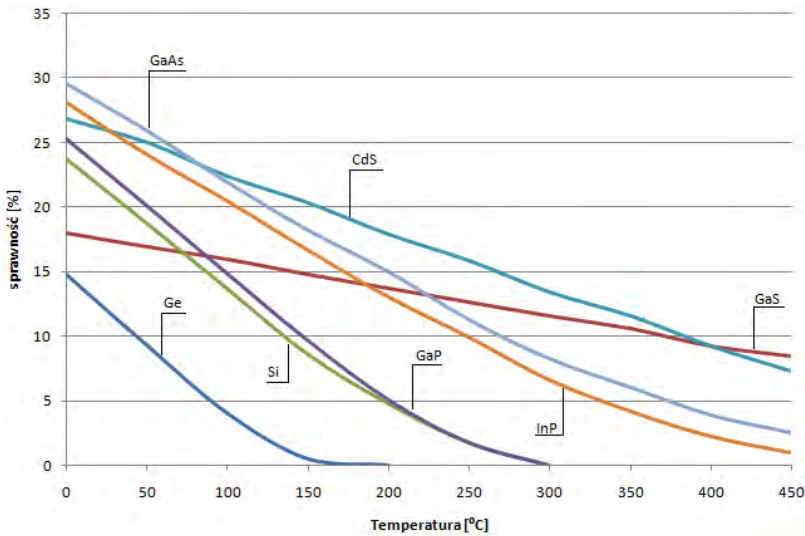
Ponadto, wydajność obu urządzeń składowych jest silnie uzależniona od natężenia padającego promieniowania oraz temperatury pracy. Krzywe sprawnościowe dwóch podstawowych typów kolektorów słonecznych: płaskich (wykorzystywanych w panelach PVT) i próżniowych (Wiśniewski i in., 2008) pokazano na rysunku 1.



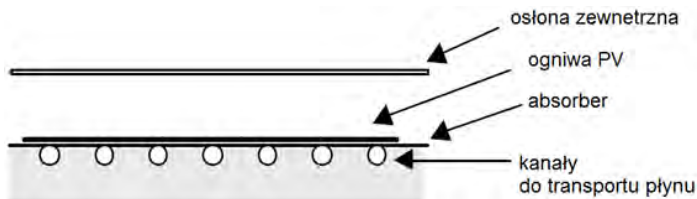
Rys. 1. Zależność sprawności kolektorów od różnicy temperatur absorbera i otoczenia (opracowanie własne na podstawie (www.viessmann.pl/pl/budynki-mieszkalne.html, 2018))

Najlepsze efekty pracy ogniw fotowoltaicznych uzyskiwane są w charakterystycznym dla danego materiału zakresie temperatur. Ich wydajność znacząco spada wraz ze wzrostem temperatury modułów (np. dla ogniw krzemowych ok. 0,5%/°C) (Pluta, 2003). Efekt ten przedstawiono na rysunku 2.

Przekrój przez typowy panel PVT pokazuje rysunek 3. Ogniwa fotowoltaiczne są przyklejane na absorberze; bezpośrednio pod nim znajduje się system kanałów wypełnionych płynem transportującym ciepło. Przepływająca ciecz odbiera ciepło z części fotowoltaicznej, zwiększając tym samym jej sprawność.



Rys. 2. Zależność sprawności różnych typów ogniw od temperatury pracy (opracowanie własne na podstawie (Venkatesan i in., 2017))



Rys. 3. Przekrój przez budowę typowego panelu PVT (Pluta, 2003)

Niskotemperaturowe wodne panele PVT stosowane są przy ogrzewaniu podłogowym czy podgrzewaniu wody w basenach. Średnotemperaturowe natomiast służą do produkcji ciepłej wody użytkowej (Bosanac i in., 2003). Zastosowanie w jednym urządzeniu ogniw fotowoltaicznych oraz kolektora wodnego pozwala na redukcję zajmowanej przestrzeni o połowę. Dla optymalnej pracy hybrydy musi być osiągnięty kompromis między ilością wyprodukowanej energii elektrycznej i cieplnej (Khelifa i in., 2015). W istniejących instalacjach eksperymentalnych moc cieplna instalacji jest ok. 3-7 razy większa niż moc elektryczna (Pluta, 2003).

1. Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne przeprowadzono na prototypowym kolektorze hybrydowym (rys. 4), wykorzystującym wodę jako czynnik roboczy. Kolektor ten o w pełni otwartej konstrukcji został zaprojektowany w celu testowania m.in. sposobów cieplnego sprzęgania modułów fotowoltaicznych z kolektorowymi i jego głównym zadaniem jest walidacja tworzonych modeli obliczeniowych. W związku z tym nie jest zoptymalizowany pod kątem sprawności czy uzysku energetycznego.

Wyniki pracy kolektora, zebrane w tabeli 1, posłużyły do walidacji modelu dynamicznego zaprojektowanego w programie TRNSYS.



Rys. 4. Badany kolektor PVT (opracowanie własne)

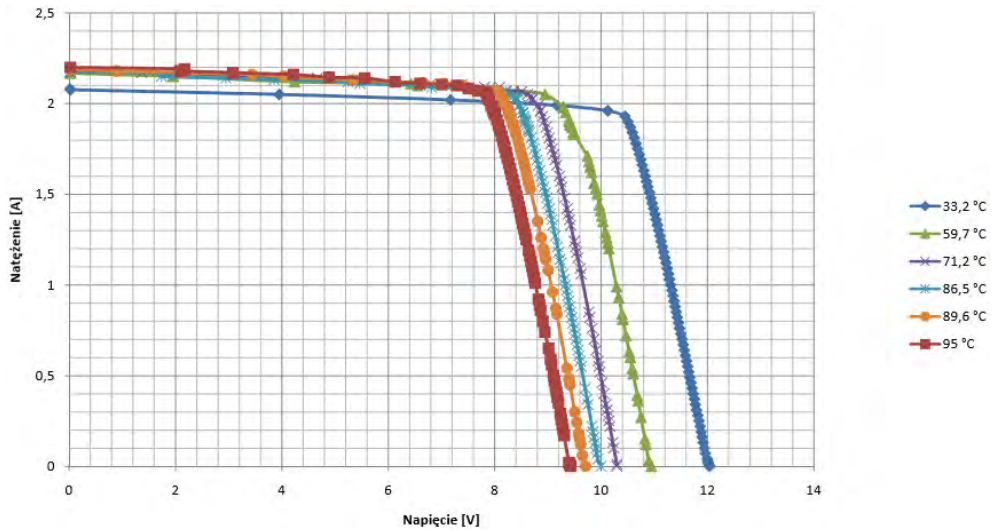
Badane urządzenie jest złożeniem monokrystalicznego panelu fotowoltaicznego zawierającego 35 ogniw ułożonych na płycie i zatopionych w warstwie sylikonu. Funkcję kolektora spełnia rura miedziana spłaszczona z jednej strony i tworząca 21 równoległych do siebie kanałów. Jako źródło promieniowania wykorzystano zestaw 9 lamp halogenowych o mocy maksymalnej 500 W każda, umieszczonych 0,5 m od powierzchni panelu, co dało wypadkowe natężenie promieniowania równe $1379 \pm 69 \text{ W/m}^2$.

Tabela 1. Wyniki walidacji modelu obliczeniowego wg rysunku 7 (opracowanie własne)

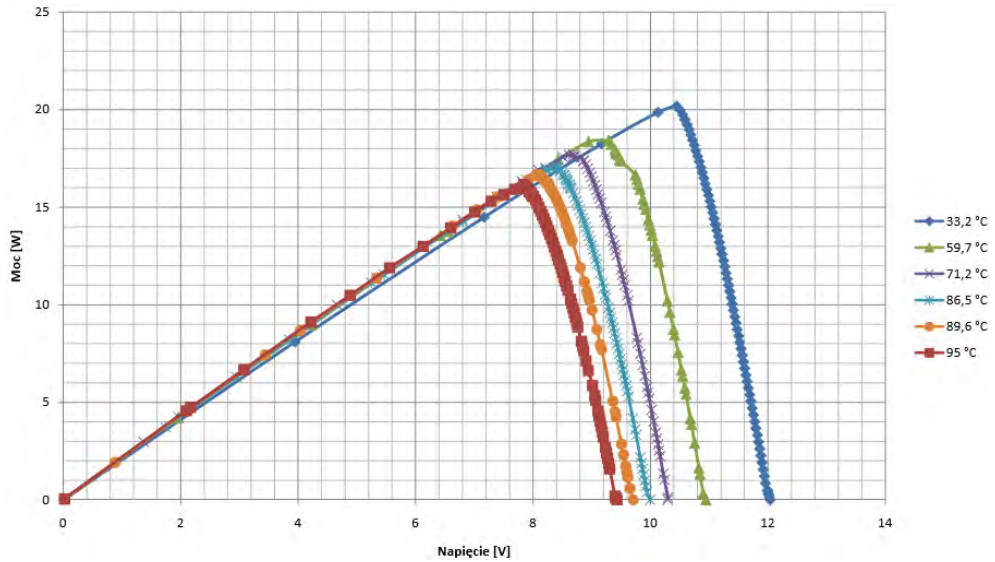
Wielkość	Wyniki badań laboratoryjnych	Wyniki symulacji
Średnia moc cieplna, W	222,3±33,6	195,9
Średni przyrost temperatury, °C	4,2±0,6	4,2
Sprawność cieplna, %	29,3±5,1	31,34

Można zauważyć, że w przypadku symulacji moc kolektora hybrydowego jest mniejsza od mocy uzyskanej podczas badań, lecz mieści się w przedziale błędów wyników otrzymanych podczas badań laboratoryjnych. Średni przyrost temperatury oraz sprawność cieplna modelu również zawierają się w granicach błędów. Otrzymane charakterystyki prądowo-napięciowe oraz mocowe ogniw PV zaprezentowano na rysunkach 5 i 6.

Na podstawie rysunku 5 wraz ze wzrostem temperatury zauważa się zmniejszenie napięcia U_{OC} i nieznaczny wzrost prądu I_{SC} . Skutkuje to ostatecznie pogorszeniem się wydajności i zmniejszeniem mocy szczytowej panelu, co widoczne jest na charakterystyce mocowej (rys. 6). Spadek mocy pomiędzy najniższą a najwyższą temperaturą to blisko 20%, co jest znaczącą różnicą w przypadku przemysłowej produkcji energii elektrycznej.



Rys. 5. Charakterystyki prądowo-napięciowe dla badanego panelu przy danych temperaturach ogniw (opracowanie własne)



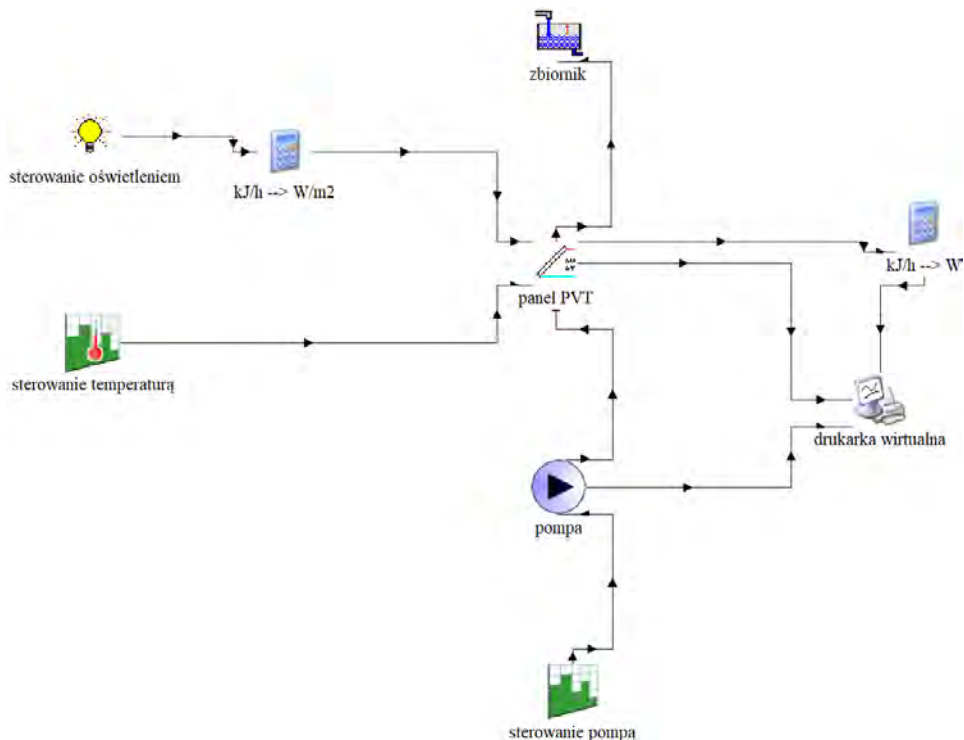
Rys. 6. Charakterystyki mocowe dla badanego panelu przy danych temperaturach ogniw (opracowanie własne)

2. Modelowanie dynamiczne w programie TRNSYS

TRNSYS (*TRaNsient SYstem Simulation program*) jest to oparte na gotowych komponentach graficzne środowisko programowania używane do symulacji procesów o dużej dynamice zmian. Baza komponentów jest stworzona w taki sposób, aby użytkownik mógł wykorzystywać istniejące elementy lub tworzyć swoje własne.

2.1. Walidacja laboratoryjna modelu instalacji PVT

Analogicznie do rzeczywistego schematu instalacji stworzono model o schemacie przedstawionym na rysunku 7. Składa się on z następujących elementów: pompy wymuszającej przepływ wody, panelu PVT ogrzewającego płyn roboczy, zbiornika będącego ujściem dla ogrzanej wody oraz komponentów odpowiadających za warunki zewnętrzne panujące podczas symulacji i zaprezentowanie wyników.



Rys. 7. Schemat badanej instalacji zaprojektowanej w programie TRNSYS
(opracowanie własne)

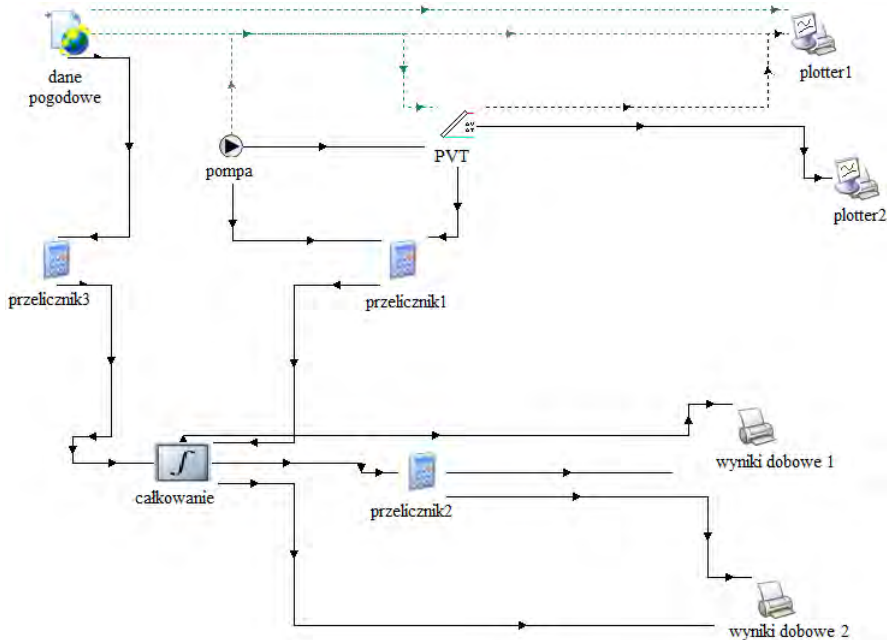
Parametry wejściowe, takie jak temperatura otoczenia, przepływ masowy, intensywność promieniowania oraz czas odpowiadają uśrednionym warunkom, jakie panowały podczas przeprowadzonych badań. Otrzymane wyniki zostały zwalidowane poprzez porównanie ich z rezultatami badań eksperymentalnych (tab. 1).

2.2. Budowa modelu właściwej instalacji

W kolejnym etapie prac stworzono modele trzech instalacji: fotowoltaicznej, fototermicznej i hybrydowej, aby zbadać wydajność ich pracy w trakcie roku oraz porównać uzyski energii elektrycznej i ciepła w odniesieniu do jednostki powierzchni. Dane pogodowe Meteonorm wybrano dla lokalizacji Kraków Balice. Najważniejsze parametry techniczne wykorzystanych paneli PV i kolektora termicznego zebrano w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry urządzeń wykorzystanych w symulacjach
(opracowanie własne)

Parametry elektryczne		
Wielkość i jednostka	Panel fotowoltaiczny	Kolektor hybrydowy
Opis	Poli-Si, 72 ogniwa	
Moc znamionowa, W	300	
Prąd znamionowy, A	8,21	
Prąd zwarciovowy, A	8,75	
Napięcie nominalne, V	36,54	
Napięcie układu otwartego, V	45,1	
Temperaturowy współczynnik mocy, %/°C	-0,41	
Sprawność, %	15,5	
Parametry cieplne		
Wielkość i jednostka	Płaski kolektor słoneczny	Kolektor hybrydowy
Opis	absorber aluminiowy, meandrowy układ rur	absorber aluminiowy, kapilarny układ rur
Szczytowa moc przy natężeniu 1000 W/m ² , W	1165	1037
Powierzchnia apertury, m ²	1,82	1,86
Pojemność cieczowa, l	1,1	1,2
Sprawność, %	64	55,5

**Rys. 8.** Schemat instalacji PVT zaprojektowany w programie TRNSYS
(opracowanie własne)

Rysunek 8 ilustruje powiązania między poszczególnymi komponentami programu TRNSYS dla docelowej instalacji PVT. Analogiczne schematy zostały stworzone dla pozostałych urządzeń. Zastosowanie komponentów, takich jak plotery, przeliczniki, drukarki i integratory, znacznie ułatwia obróbkę i analizę otrzymanych rezultatów.

2.3. Wyniki przeprowadzonych symulacji

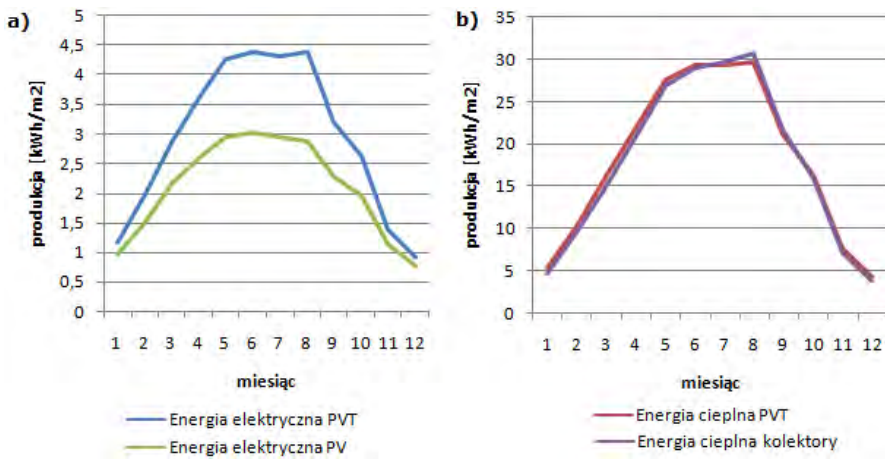
W tabeli 3 przedstawiono parametry pracy urządzeń odniesione do jednego roku ich działania. Zauważyć można, że produkcja energii elektrycznej odbywa się z większą sprawnością w kolektorze hybrydowym - średnio o ok. 2,5 punktu procentowego. W skali roku daje to zysk 10 kWh na każdym metrze kwadratowym instalacji. Praca kolektorów słonecznych, zarówno jako osobnej instalacji, jak i w połączeniu z fotowoltaiką, daje podobne rezultaty: sprawność odpowiednio 65 i 69%. Sumarycznie, panel hybrydowy jest w stanie przetworzyć ok. 78% padającego promieniowania słonecznego na energię użytkową. Wyniki symulacji pokazały, że jeden kolektor hybrydowy jest w stanie wyprodukować w ciągu roku 408 kWh energii cieplnej oraz 65 kWh energii elektrycznej.

Tabela 3. Najważniejsze parametry badanych urządzeń (opracowanie własne)

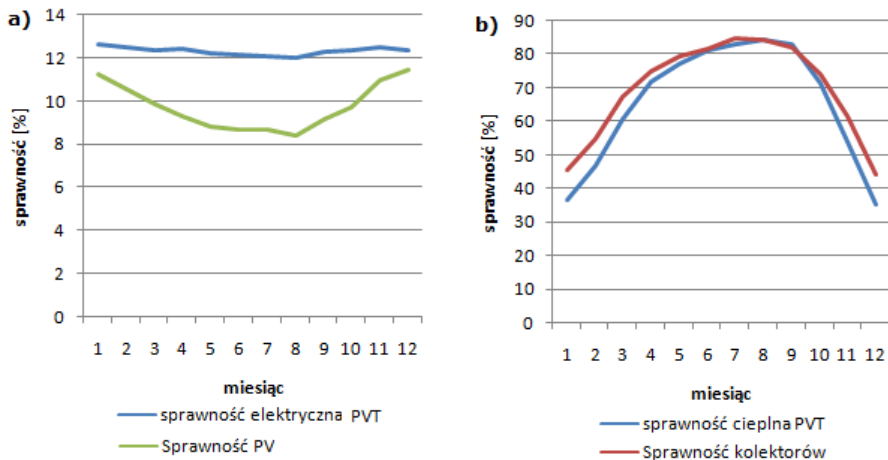
	Panel PV	Panel PVT - część PV	Kolektor słoneczny	Panel PVT - część kolektorowa	Panel PVT
Sprawność, %	9,8	12,3	69,4	65,3	77,6
Średni uzysk energii Wh/m ²	69	96	601	591	697
Roczny uzysk energii kWh/m ²	25,2	35,1	219,2	215,8	254,4

Rozkłady produkcji w poszczególnych miesiącach zaprezentowano na rysunku 9. Produkcja CWU ma niemal identyczny przebieg dla obu instalacji. Największa część energii termicznej jest produkowana w miesiącach o odpowiednio wysokim nasłonecznieniu i jednocześnie wysokiej temperaturze powietrza, co sprzyja ogrzewaniu się czynnika roboczego. Widać natomiast wyraźną różnicę w przebiegu produkcji energii elektrycznej. W miesiącach letnich oraz przejściowych, gdy moduły fotowoltaiczne pracują w podwyższonej temperaturze, ich wydajność spada; zastosowanie chłodzenia pozwoliło znacznie podnieść ich wydajność.

Rysunek 10 pokazuje, jak w poszczególnych miesiącach wyglądały sprawności poszczególnych instalacji. Dla instalacji fotowoltaicznej sprawność wyraźnie spada w miesiącach o wysokiej temperaturze, natomiast przebieg krzywej dla kolektora PVT jest bardziej wyrównany; spadek wydajności jest znacznie mniejszy. W trakcie roku kolektory słoneczne wykazują się wyższą sprawnością niż hybrydowe, ponieważ ich absorber nie jest zasłonięty modułami PV. Największe sprawności przypadają na miesiące letnie, gdy spada różnica temperatur pomiędzy absorberem a otoczeniem.



Rys. 9. Uzysk energii ciepłej (a) i elektrycznej (b) w poszczególnych miesiącach w odniesieniu do 1 m² instalacji PVT, fotowoltaicznej oraz kolektorowej (opracowanie własne)



Rys. 10. Rozkład sprawności elektrycznej (a) i ciepłej (b) w poszczególnych miesiącach w odniesieniu do 1 m² instalacji PVT, fotowoltaicznej oraz kolektorowej (opracowanie własne)

Przyjmując dzienne zużycie CWU przez jedną osobę na poziomie 50 l oraz podgrzewanie wody wodociągowej o średniej temperaturze 12°C do 40°C, można stwierdzić, że średnio od maja do października jeden kolektor hybrydowy wystarczy na pokrycie tego zapotrzebowania.

Podsumowanie

Technologia hybrydowych paneli słonecznych ma szansę rozpowszechnienia w instalacjach domowych ze względu na jednoczesną produkcję ciepła i elektrycz-

ności przy zachowaniu stosunkowo małych rozmiarów. Zrealizowane badania pozwalają stwierdzić, że chłodzenie paneli fotowoltaicznych ma duże znaczenie dla ich sprawności - pozwalają zwiększyć ją nawet o 26% (2,5 punktu procentowego), co jest szczególnie widoczne w miesiącach letnich, kiedy jej przebieg w czasie jest wyrównany i nie obserwuje się tak wyraźnego spadku jak w przypadku tradycyjnych paneli. Przeprowadzona symulacja pozwala stwierdzić, że przekłada się to na zysk ok. 10 kWh energii elektrycznej na każdym metrze kwadratowym instalacji.

Parametry cieplne zachowują się podobnie zarówno dla kolektora hybrydowego, jak i tradycyjnego. Ilość wyprodukowanej energii jest bardzo zbliżona, jednak panel PVT ma niższą sprawność, ponieważ płyta absorbera jest zasłonięta przez ogniwa fotowoltaiczne. Różnica ta uwydatnia się zwłaszcza w miesiącach zimowych, gdzie ilość padającego promieniowania słonecznego jest mniejsza.

Znaczącym ograniczeniem jest możliwość odbioru ciepła; nadmierne ogrzewanie może prowadzić do uszkodzeń części fotowoltaicznej kolektora. Dlatego istotna jest jakość termozłącza w hybrydzie, ustalenie odpowiedniego przepływu czynnika roboczego i zastosowanie sterowania dynamicznego w połączeniu z zapewnieniem wykorzystania przez użytkowników wytworzonej CWU.

Przy projektowaniu instalacji solarnych duże znaczenie mają symulacje komputerowe, które umożliwiają optymalizację ich pracy w warunkach rzeczywistych. Powodzenie tego działania jest jednak silnie uzależnione od znajomości parametrów technicznych urządzeń oraz panujących warunków zewnętrznych, będących parametrami wejściowymi wprowadzanymi do programu. Nie mniej ważna jest walidacja doświadczalna tworzonych modeli. Dzięki zastosowaniu danych pogodowych dla konkretnej lokalizacji i odpowiednio małego kroku czasowego program TRNSYS pozwala przewidzieć z dużą dokładnością zachowanie instalacji.

Bibliografia

- Bosanac, M., Sorensen, B., Katic, I., Sorensen, H., Nielsen, B. & Badran J. (2003) *Photovoltaic/Thermal Solar Collectors and Their Potential in Denmark*. EFP Project 1713/00-0014, 4, 6, 23, 36-40.
- Khelifa, A., Touafek, K., Ben Moussa, H., Tabet, I., Ben cheikh El hocine, H. & Haloui, H. (2015) *Analysis of a hybrid solar collector photovoltaic thermal*. Energy Procedia, 74, 835-836.
- Lewandowski, W.M. & Klugmann-Radziemska, E. (2017) *Proekologiczne odnawialne źródła energii*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 75-78, 163, 175, 348-351, 356-359.
- Pluta, Z. (2003) *Słoneczne instalacje energetyczne*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 9-14, 207-209, 216-219, 222-223.
- Venkatesan, A., Gopal, V., Mahes Kumar, K., Puja N. & Sooraj R. (2017) *Computational analysis of performance of solar photovoltaic thermal system*. IJARMATE, 3/9, 85.
- Wiśniewski, G., Gołębiowski, S., Gryciuk, M., Kurowski, K. & Więcka A. (2008) *Kolektory słoneczne. Energia słoneczna w mieszkalnictwie, hotelarstwie i drobnym przemyśle*. Warszawa, Dom Wydawniczy Medium, 30-33, 79-81, 99-100, 158-161.
- www.viessmann.pl/pl/budynki-mieszkalne.html (dostęp marzec 2018).

The dynamical modelling of thermophotovoltaic installations

Abstract: In response to rising demand for renewable energy it is necessary to search for new ways of its production. One of the high-efficient solutions might be the hybrid of photovoltaic cells and photothermic collectors. Its final electric efficiency outmatches any other standard installations due to its liquid cooling. Additional advantage is heat of the mentioned cooling fluid which may be used for production of domestic hot water. This thesis presents the results of computer dynamic model and practical analysis of monocrystalline photovoltaic module and heating collector bind together to create hybrid PVT system. The experimental studies allowed to define the electrical and thermal characteristics of system with hybrid solar collector, which were used to validation of created dynamic model. Simulations in TRNSYS software enabled analysis of operating parameters of various installations during the year.

Keywords: renewable energy sources, photovoltaics, photothermics